

## 論文内容の要旨

博士論文題目：プレフィルタ統合型フィードバック誤差学習制御に関する研究  
氏名：野口 慎

(論文内容の要旨)

フィードバック誤差学習（以下、FEL: Feedback Error Learning）は生体の運動制御における学習機構であり、人間工学やロボティクスなど、広い分野で注目されている。近年、このモデルに基づき、線形フィルタによって計算機に実装することで適応制御系として構成し、解析や設計を行うという研究が活発になされている。本論文はこの手法をさらに発展させたものである。

第1章では、FELに関する研究の流れを概観し、主として多変数線形制御理論の枠組みで、これまでに明らかにされたことや課題を論じている。

第2章では、プレフィルタ統合型FELの基本形を導入している。これまでの研究により、制御対象が厳密にプロパな場合、その相対次数に対応する遅れを持つプレフィルタを置く必要があることが示され、その多変数化も既になされている。しかし、その結果、FELのフィードフォワード要素のパラメータに、設計者が事前に与えたプレフィルタのそれが含まれるという冗長性が避けられなかった。本論文ではプレフィルタの内部状態を有効利用するフィードフォワード構造を提案し、この冗長性を取り去っている。

第3章では、第2章で提案したプレフィルタ統合型の学習則を改良している。従来の勾配に基づく学習則は直感的には自然であるものの、ある種の近似を含み、また正実性の仮定のもとでしか収束が保証されず、特に相対次数が大きい場合は収束しないことが多かった。この難点は、一入出力系では線形誤差モデルに基づく学習則で解消できることが知られている。本章ではこれを多入出力系かつプレフィルタ統合型に拡張している。さらに固定ゲイン・可変ゲインによる学習則の高速化にも成功している。

最後に第4章では、上記の線形誤差モデルによる学習則が持っている副作用を解決する手段を導いている。これは、フィードフォワードの信号経路を改良した結果フィードバックにも可変なブロックが挿入されてしまったためであり、これまで指摘されたことはなかった。本章では仮想フィードバック誤差学習と呼ばれる新たなフィルタ構造を導入することで、この可変ブロックを含まないFELの手法を提案している。

以上の3手法はいずれもシステム制御工学に新たな知見を与えるものであり、今後、様々な分野に応用されるものと期待できる。

(論文審査結果の要旨)

本研究は、生体の運動学習モデルとして機械学習と制御工学の双方で注目されているフィードバック誤差学習を2自由度制御系設計手法として捉え、その制御構造と学習則を精密に検討し改良を行ったものである。線形システムに対する適応制御の研究の歴史は数十年に及び、安定性に関する膨大な議論がなされているが、その多くはフィードバック制御器を調整しシステムを安定化するという基本方針を取っており、そのため過渡特性に優れず、場合によっては不安定化さえ生じる懸念がある。これに対し、2自由度構成のうちフィードバックは設計者が与え、その性能が不十分であっても、その誤差をもとにフィードフォワードを調整するというフィードバック誤差学習制御は、過渡特性や安定性の面で画期的な効果をもたらすものとして期待できる。一方、機械学習の観点からは教師なし学習の一種と見なすこともでき、理論面でも興味深い。

本論文は、このフィードバック誤差学習制御に対して3つの点で貢献するものである。第1には2自由度構成に特有のプレフィルタを有効利用して学習を効率化した点であり、特に有限零点を持たない(一入出力システムでは分子が定数の)制御対象に対して最も効力を発揮する。第2はフィードフォワード要素の信号経路を工夫することにより線形誤差モデルを導き、これによってプレフィルタ統合型の更新則を改良したことである。この基本概念は一入出力システムでは既に知られていたが、行列演算が可換でないため本研究で初めて多入出力への拡張に成功したものである。また、この誤差モデルに最小2乗推定法を適用し、可変ゲイン型の更新則も導出することによって忘却係数の設定も可能にした。第3に上記の改良型学習則が持つ副作用を解消している。すなわち、制御対象が有限零点を持つ場合、フィードバック制御器の側に時変ブロックが挿入されてしまい、閉ループの安定性が保証されないという問題に対し、1自由度構成でのフィードバック誤差学習を導入することによって本問題を解決するという仮想フィードバック誤差学習制御を提案し、その有効性を検証している。

以上のように本論文は、生体の運動学習モデルに基づくフィードバック誤差学習をシステム制御工学、特に適応制御の枠組みのもと、極めて精密な手法として完成させたもので、学習と制御という異分野の融合研究としても意義深いものであり、システム科学の分野において学術上、実用上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

氏名	野口 慎
----	------

(最終試験結果の要旨)

平成 23 年 2 月 15 日、全審査委員により、学位申請者に対する論文内容及びそれに関連する事項についての試問を行ない、合格と判定した。